



**Tunnels anciens en contexte de versant instable -
Mécanismes d'instabilités et pathologies des ouvrages -
Le cas du tunnel de l'Encombrouze (France).**

Lionel Causse, Roger Cojean, Jean-Alain Fleurisson

► **To cite this version:**

Lionel Causse, Roger Cojean, Jean-Alain Fleurisson. Tunnels anciens en contexte de versant instable - Mécanismes d'instabilités et pathologies des ouvrages - Le cas du tunnel de l'Encombrouze (France).. Conférence Franco-Vietnamienne CIGOS 2013 - Construction et Développement Durable, Apr 2013, LYON, France. 8 p. hal-00847161

HAL Id: hal-00847161

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00847161>

Submitted on 22 Jul 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Tunnels anciens en contexte de versant instable – Mécanismes d’instabilités et pathologies des ouvrages – Le cas du tunnel de l’Encombrouze (France).

Lionel CAUSSE (lionel.causse@mines-paristech.fr), Roger COJEAN (roger.cojean@mines-paristech.fr), Jean-Alain FLEURISSON (jean-alain.fleurisson@mines-paristech.fr) – Mines ParisTech – Centre de Géosciences – 35 rue Saint Honoré 77305 Fontainebleau.

Résumé

Les rétro-analyses de tunnels anciens en contexte de versants instables ont conduit à considérer différentes situations de tunnels entrant dans un versant : tunnel transversal au versant, tunnel oblique par rapport à celui-ci, ou tunnel longeant le versant sous une faible couverture. Les pathologies identifiées dans la structure de l’ouvrage varient en fonction de ces situations. Cette recherche s’intéresse à différents mécanismes d’instabilités de versant, particulièrement aux processus de fluage ainsi qu’aux désordres affectant la structure de tunnels traversant ces versants. L’analyse de la Zone d’Influence Géotechnique (ZIG) de ces ouvrages en situation de versant est un point important de cette recherche.

L’étude de cas présentée correspond au tunnel ferroviaire de l’Encombrouze situé au niveau de la demi-fenêtre de l’Argentière, échancrant un anticlinal de nappes, au Nord de l’Argentière-la-Bessée (05). Cet ouvrage ancien, maçonné, est sub-parallèle au versant et est situé sous une faible couverture, situation commune de nombreux ouvrages anciens lorsque les méthodes de creusement ne permettaient pas de s’enfoncer profondément dans le massif.

Après avoir présenté l’ouvrage et ses pathologies, les différents contextes géologique, géomorphologique, hydrogéologique et sismique sont abordés dans le but de mettre en évidence leurs influences relatives sur la cinétique des mouvements du versant. Plusieurs sections du tunnel sont considérées et les pathologies associées présentées. Elles rendent compte des interactions versant instable/tunnel. Enfin, cette recherche conclura sur les mécanismes prépondérants considérés comme moteurs principaux des instabilités locales, responsables des pathologies observées dans la structure de l’ouvrage.

1. Introduction

Les rétro-analyses de tunnels anciens en contexte de versants instables ont conduit à distinguer différentes situations de tunnels entrant dans un versant : tunnel transversal au versant, tunnel oblique par rapport à celui-ci, ou tunnel longeant le versant sous une faible couverture. Les pathologies identifiées dans la structure de l’ouvrage varient fortement en fonction de ces situations (Wang T.T, 2010).

- Cas d’un tunnel perpendiculaire à la direction du mouvement du versant (Fig 1, a) : la déformation de cisaillement du profil se produit principalement sur la section transversale. Une fois passé le seuil de résistance de la structure on constate l’apparition de fissures longitudinales à l’axe du tunnel.
- Cas d’un mouvement du versant parallèle à l’orientation générale du tunnel (Fig 1, b) : la déformation de cisaillement se répartit sur le profil longitudinal. La rupture de l’ouvrage est caractérisée par l’apparition de fissures transversales à l’axe du tunnel.
- Cas d’un tunnel oblique à la direction du mouvement (Fig 1, c) : la déformation de cisaillement est répartie sur les profils longitudinal et transversal du tunnel. La rupture de l’ouvrage est caractérisée par l’apparition de fissures inclinées accompagnées de fissures en échelon.

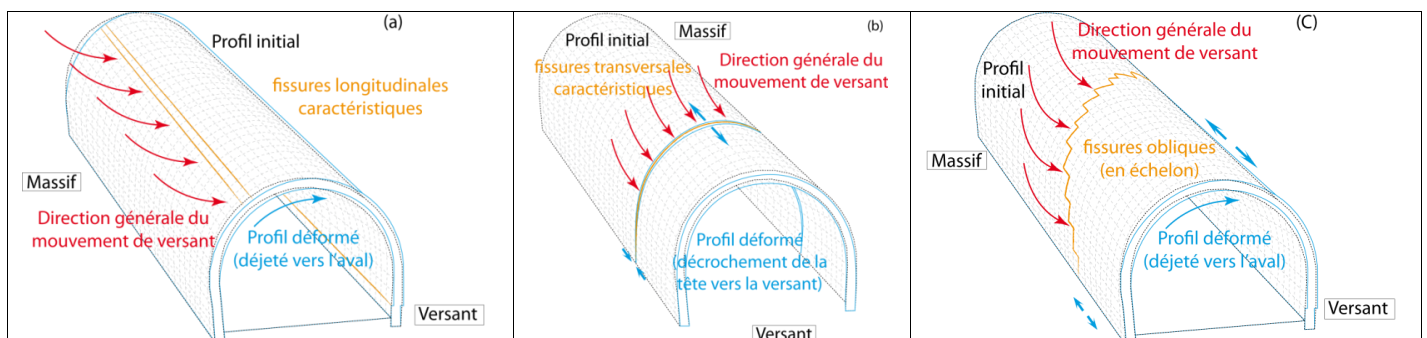


Figure 1 : Fissures caractéristiques d'un tunnel en fonction de sa situation par rapport à la direction du mouvement de versant.

Dans le but de mieux comprendre la cinétique de l'apparition des pathologies sur l'ouvrage et les mesures de confortement à mettre en œuvre, il est essentiel d'appréhender les moteurs des instabilités de versant à travers les différents contextes géologique, géomorphologique, hydrogéologique et sismique du site d'étude.

2. Rétro-analyse d'étude de cas du tunnel de l'Encombrouze

Le tunnel de l'Encombrouze, localisé dans le département des Hautes-Alpes (05) est situé sur la ligne Veynes – Briançon, à environ 2,5 km au Nord de l'Argentière-la-Bessée et 10 km au Sud de Briançon. Cet ouvrage à voie unique de 447 m de long présente un gabarit d'ouverture aux naissances de 4,30 m.

Construit en 1884, il est caractérisé par un revêtement en grande partie maçonné présentant de nombreux désordres évoluant lentement et ayant nécessité des réparations et réfections fréquentes pour certaines sections de la structure. Sa situation morphologique est parallèle au versant, à faible profondeur.

Les différents contextes géologique, géomorphologique, hydrogéologique et sismique du versant sont abordés dans le but de mettre en évidence leurs influences relatives sur la cinétique des mouvements du versant. Pour finir, les différentes pathologies de l'ouvrage seront présentées.

2.1. Contexte géologique

Le versant de la Vignette dans lequel a été creusé le tunnel de l'Encombrouze est situé au niveau de la demi-fenêtre de l'Argentière au sein du domaine interne de la chaîne subalpine, structurée en unités structurales orientées globalement N-S. Cet ensemble de nappes de charriages, mises en place à partir du Crétacé supérieur, se chevauchent vers l'WSW.

Au niveau du site de l'Encombrouze, la nappe Briançonnaise, allochtone chevauche la nappe subbriançonnaise, laquelle chevauche les unités Dauphinoises plus à l'Ouest. Des déformations « post-nappes » plus récentes (30 à 40 Ma) ont affecté ces structures, notamment avec la formation de structures anticlinales et synclinales à grands rayons de courbure.

C'est dans ce contexte qu'affleurent les formations subbriançonnaises au niveau du site d'étude grâce à la structure nommée « demi-fenêtre de l'Argentière ». Elle correspond à un anticlinal simple, plongeant vers le SE, d'axe NW-SE au Nord passant latéralement au sud à un anticlinorium comprimé d'axe NNW-SSE au niveau du Ravin de Rouyes (verrou glaciaire), au Sud de l'Argentière-la-Bessée. Cette structure, déversée à l'Ouest (Gignoux et Moret, 1938), se surimpose aux nappes de charriages.

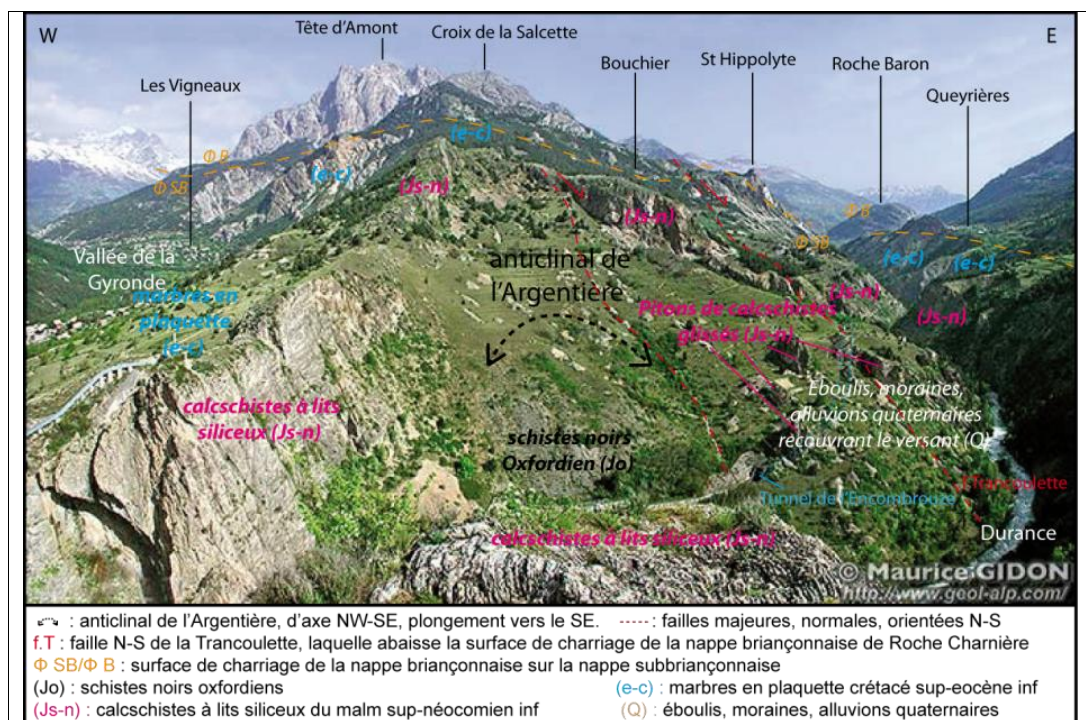


Figure 2 : Panorama illustré du site du tunnel de l'Encombrouze présentant la structure du versant en masse et paquets glissés.

Ces structures sont affectées par le faisceau de failles de la haute Durance (FFHD), orienté N 160° à N-S et dont le jeu considéré couissant dextre en extension, est à l'origine de l'effondrement du compartiment Est (Fenart P., 2007).

Une fracturation secondaire conjuguée au FFHD, orientée E-W à N110 et présentant un jeu décrochant senestre, découpe le site du versant de la Balmette (Tricard P. et al., 1996). Ces accidents secondaires ne semblent pas modifier considérablement le schéma structural proposé.

L'influence de la faille majeure de ce faisceau de faille est assurée par l'une ou l'autre des failles en fonction des transversales. L'orientation générale du FFHD au niveau du site d'étude est N-S à N160.

Cette fracturation conjuguée a permis d'expliquer le découpage des énormes blocs de calcschistes du Malm des flancs de l'anticlinal au sein des unités subbriançonnaises. L'érosion des terrains plus tendre au cœur de l'anticlinal (schistes noirs de l'Oxfordien) et enfin le glissement des blocs de calcschistes dans le versant résultant de l'évolution quaternaire du versant.

Au niveau du site d'étude et plus précisément au niveau du tunnel, seules les unités subbriançonnaises ont été identifiées. Seules les descriptions sommaires des formations rencontrées au niveau de l'encaissant proche du tunnel vont être présentées :

Callovo-Oxfordien : il est représenté par des schistes et calcschistes noirs, avec veines de calcite, et constitue un niveau tendre, relativement plastique et potentiellement sujet au fluage.

Malm-Néocomien : cette formation est représentée par des calcaires et calcschistes à lits siliceux gris. Elle devient plus calcaire et compacte vers le sommet et adopte véritablement l'aspect du Tithonique subalpin armant les crêtes. Elle est marquée par un intense plissement, permettant d'expliquer l'épaisseur apparente de l'ordre de 100 mètres alors que l'épaisseur réelle ne doit pas dépasser plus de 20-30 mètres (Debelmas J., 1955).

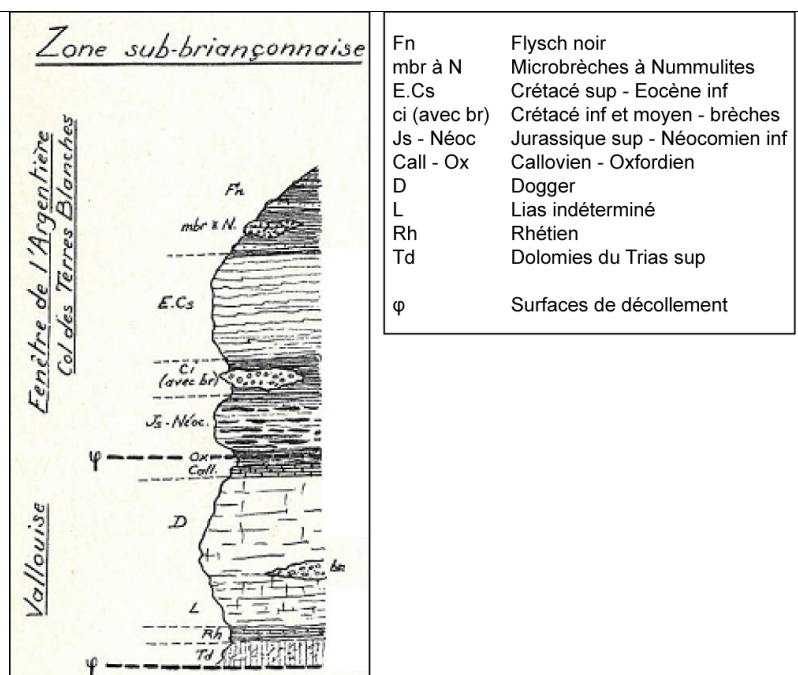


Figure 3 : Log stratigraphique des formations rencontrées (d'après Debelmas J., 1955)

Le versant de l'Encombrouze est également constitué des formations superficielles Quaternaire en place ou partiellement remaniées :

- formations d'éboulis de pente, constituées de graviers à éléments de schistes noirs oxfordiens, calcschistes du Malm-Néocomien et des blocs de roches intrusives (reliques de moraines glaciaires remaniées par la Durance) (Chapelard, 1978) ;
- conglomérats partiellement grésifiés à galets, formés par des alternances de dépôts fins et plus grossiers correspondant à des dépôts fluvio-glaciaires de lac de barrages (Causse L., 2012) ;
- moraines glaciaires (blocs polygéniques arrondis et striés englobés dans une matrice silteuse).

Au niveau du versant et de l'ouvrage : la formation du Callovo-Oxfordien, constituant le cœur de l'anticlinal de nappe, affleure peu car elle est recouverte par des formations superficielles. Pour une partie des sections de l'ouvrage (notamment du PM72 au PM430), cette formation constitue l'encaissant du tunnel.

La formation du Malm-Néocomien est présente au niveau du versant de l'Encombrouze sous la forme des énormes blocs de calcschistes prédécoupés puis glissés et déplacés sur le versant. Au niveau de l'ouvrage, ce faciès constitue l'encaissant du tunnel pour certaines sections creusées à travers ces énormes blocs de calcschistes déstabilisés (principalement du PM0 au PM61).

Les formations Quaternaires formant la couverture superficielle du versant, interceptent en partie la structure de l'ouvrage au niveau de 2 sections de l'ouvrage (notamment du PM46 au PM72 et du PM430 au PM440).

2.2. Contexte géomorphologique

Ce tunnel est situé sur la rive droite de la Durance entre les cotes 1050 et 1055 m au niveau des têtes de tunnel et il présente une pente montante d'environ 25 mm/m en direction de Briançon. L'axe du tunnel, sensiblement Nord-Sud le définit comme un tunnel pseudo-parallèle au versant, sous une faible couverture d'épaisseur maximum 47 m, laquelle est hétérogène en nature et en épaisseur.

L'analyse hypsométrique réalisée par Fenard P., (2008) a permis de mettre en évidence des pentes plus douces du site d'étude par rapport à celles régnant dans la région. De plus la présence d'un replat étendu dans le versant aux alentours de 1200 m est un facteur favorable aux infiltrations des eaux de pluies.

L'évolution de la morphologie du versant au niveau du site est très intéressante du point de vue façonnement glaciaire des vallées alpines suivi de l'histoire post-glaciaire holocène (Cojean R., 2008).

La Durance arrive en confluence avec la Gyronde à environ 1 km au Sud du site de l'Encombrouze grâce à une gorge de raccordement, laquelle reliait au Würm le glacier suspendu de 200 m de la vallée de la Durance à celui plus imposant de la vallée de la Gyronde. Le retrait glaciaire a dû affecter en premier lieu, le glacier de la Durance, moins imposant, créant ainsi une retenue provisoire avec dépôts de sédiments fins derrière le barrage naturel constitué par le glacier de la Gyronde. Depuis la fonte des glaciers, la Durance tend à régulariser son profil d'équilibre depuis la gorge de raccordement sur plusieurs kilomètres en amont du site, érodant ainsi fortement le pied du versant de l'Encombrouze.

Au droit du site d'étude, légèrement à l'aval de la grande terrasse alluviale de Villard Meyer, l'érosion a dû entailler le fond de vallée sur plus d'une centaine de mètres (Cojean, R., 2008). Au niveau du versant de l'Encombrouze, l'érosion importante de la Durance a conduit à la déstabilisation et au remaniement de ces dépôts superficiels, avec des blocs de poudingues basculés et glissés sur le versant. Il n'est donc pas anormal de rencontrer des dépôts fluvio-glaciaires et glacio-lacustres en couverture du versant.

La présence de blocs énormes de calcschistes ne présentant pas de traces de stries ou de polis glaciaires mais uniquement des plans de failles a conduit à présumer que la déstabilisation et le glissement des blocs prédécoupés par des failles n'a pu se produire qu'après la dernière glaciation du Würm lors de la phase d'érosion régressive du seuil de raccordement. Le versant a ainsi évolué par un mouvement de « masses ou paquets glissés » (Cojean R., 2008).

En conclusion au niveau du site d'étude, l'évolution de la morphologie du versant a été propice à la déstabilisation gravitaire, provoquée par une érosion en pied de versant ainsi que la décompression du versant suite au dernier retrait glaciaire. Cette déstabilisation de blocs de calcschistes préalables découpés par le FFHD a conduit à leur position anormalement « basse » sur le versant. Ils reposent sur la formation plastique des schistes noirs du Callovo-Oxfordien elle-même cachetée par les formations superficielles. Cette histoire permet de mieux comprendre les variations de la nature de l'encaissant constatées.

La cinétique lente de l'évolution morphologique du versant marquée par l'érosion en pied de versant ainsi que le fluage dû à la décompression post-glaciaire au sein de la formation Callovo-Oxfordienne semble être en rapport avec l'évolution lente mais continue des pathologies de la structure du tunnel.

2.3. Contexte hydrogéologique

Les observations de terrain accompagnées du compte rendu d'analyse des écoulements au sein des différentes formations permettent de préciser le modèle hydrogéologique du versant.

2.3.1. Identification des écoulements au niveau de l'encaissant du tunnel

Les observations réalisées en tunnel ont permis de mettre en évidence les sections du tunnel sujettes à des venues d'eau :

- Section du PM 0 au PM 59 : elle présente une très légère humidité au niveau des fissures filiformes, traduisant un très faible débit à l'écoulement au sein de l'encaissant au tunnel.

- Section du PM 59 au PM 90 : les venues d'eaux constatées au niveau des importantes fissures ouvertes dans la structure en piédroit amont et aval sont le signe d'un écoulement au sein de l'encaissant au tunnel.
- Entre le PM 160 et PM 172 : la section présente une intense humidité ayant nécessité la mise en place de bandes drainantes dans des saignées réalisées. Dans le même temps la structure du tunnel ne semble pas avoir atteint l'état de rupture (absence de fissures). Il est probable que l'encaissant du tunnel ou le massif environnant proche soit le siège d'un écoulement.
- La section sur cintre du PM 350 au PM 430 : elle présente également des écoulements au sein des fractures au niveau du piédroit amont. Le débit observé est beaucoup plus faible par rapport à celui identifié au sein de la section du PM 59 au PM 90.

2.3.2. Synthèse hydrogéologique

L'étude de Fenart P., 2007 sur la définition des aquifères du versant a permis d'apporter les précisions suivantes :

- La formation des calcschistes du Malm-Néocomien

Il est probable qu'une importante nappe aquifère siège au sein de cette formation de par la nature pétrographique de cette formation ainsi que son degré de fissuration. Les faibles écoulements sont associés à une perméabilité de fracture, voire éventuellement des dissolutions karstiques. Les calcschistes sont alimentés par l'infiltration des eaux météoriques et présentent comme exutoire principal les formations superficielles de recouvrement (Fenart P., 2007). Les faibles écoulements constatés entre le PM0 et PM59 sont représentatifs des écoulements au sein de cette formation.

- Les schistes de l'Oxfordien

La nature imperméable des schistes noirs de l'Oxfordien exclut la présence de nappe aquifère au sein de cette formation. Cette formation constitue au contraire le mur de la nappe de versant. Cependant, au niveau des zones altérées, faillées ou fracturées, il est possible que des écoulements provenant de la couverture quaternaire, plus perméable et ayant de meilleures propriétés hydrodynamiques, soient drainés vers le tunnel (Fenart P., 2007). Cette dernière hypothèse pourrait expliquer les venues d'eau constatées en tunnel au niveau de la section du PM160 au PM 172.

- Les formations superficielles de recouvrement

Les formations quaternaire constituées de colluvions, alluvions et éboulis, recouvrant le versant possèdent, de par leur nature décomprimée et déstructurée, des propriétés hydrodynamiques supérieures à celles des autres formations constituant le cœur de l'anticlinal (Fenart P., 2007). Du fait de la nature imperméable du mur de la nappe de versant, formé par les schistes noirs oxfordiens, la source principale d'alimentation de cette nappe provient des eaux d'infiltration.

La répartition hétérogène de ces formations sur le versant conduit à une grande complexité des écoulements. Les dépôts alluvionnaires anciens constituent probablement des niveaux plus perméables et poreux face aux résidus morainiques, moins perméables du fait de leurs plus grandes variations de faciès (lentilles perméables et matériaux plus fins) (Fenart P., 2007). L'analyse des eaux d'infiltration dans la structure du tunnel a montré une compartimentation des eaux d'écoulements au sein de la nappe de versant avec des temps de transferts des eaux d'infiltration différents en fonction de la zone d'infiltration et de l'exutoire dans le tunnel (Chapelard M., 1978). Les fortes venues d'eaux constatées au niveau des fissures ouvertes entre le PM59 et PM90 sont représentatives des écoulements importants au sein de cette formation.

L'étude de Fenard P. (2008), a permis d'émettre l'hypothèse d'un comportement par à-coups du versant associé aux recharges périodiques de la nappe phréatique, analogue à ce qui a été observé par Ceccucci M., (2008).

2.4. Contexte sismique

Bien que le tracé du faisceau de failles de la haute Durance soit mal connu à l'échelle régionale et du site, les déformations néotectoniques ainsi que les données sismiques ont permis de mettre en évidence une activité sismique récente (BRGM, 2009). Le versant d'étude est localisé au niveau d'une zone de sismicité moyenne

(zonage sismique de mai 2011), associée à des accélérations comprises entre 1,6 et 3 m/s². Le contexte sismique au niveau de la zone d'étude est défavorable. Il est important, même sans faire une étude quantitative, de qualifier la contribution spécifique des failles régionales à l'aléa sismique.

2.4.1. Données historiques de la sismicité régionale

D'importants séismes historiques associés au jeu de failles de la haute Durance ont pu être localisés à l'Est du site d'étude (de l'ordre d'une dizaine de kilomètres). Ces séismes d'intensités comprises entre 6 et 7,5 sur l'échelle MSK 1964, sont susceptibles d'entraîner des dommages légers aux structures des ouvrages.

2.4.2. Localisation des séismes

Les épicentres des séismes du système de failles de la haute Durance semblent se concentrer à l'Est des principaux accidents. Leurs hypocentres sont localisés majoritairement entre 5 et 10 km de profondeur avec un approfondissement du Sud au Nord (BRGM, 2009).

L'analyse du mécanisme au foyer des séismes a permis de les rattacher aux failles normales coulissantes dextres orientées N-S à NNW-SSE, présentant un pendage vers Est et correspondant aux accidents majeurs du FFHD. La propagation des fortes valeurs d'accélérations est plutôt orientée E-W, transversalement à la direction des accidents majeurs.

L'évaluation de l'aléa du système de failles de la haute Durance par une approche probabiliste a permis de mettre en évidence un intervalle des magnitudes compris entre 4,95 et 5,5. Cependant concernant l'activité sismique de ces accidents, la probabilité d'occurrence d'évènement de magnitude supérieure ou égale à 6 est de l'ordre de 1700 ans (BRGM, 2009).

En conclusion, il est impossible d'affirmer l'absence d'influence sismique sur la déstabilisation du versant ainsi que sur les dommages sur la structure du tunnel. Le levé de cette incertitude nécessiterait la mise en place d'accéléromètres sur le versant ainsi que la réalisation de mesures de déformations du versant et du tunnel en continu. Cependant du fait de l'activité sismique non négligeable des failles majeures N-S à l'Est du site d'étude et de la propagation des accélérations vers l'Ouest, l'incidence des séismes au niveau du site ne peut être écartée.

La continuité de l'évolution des désordres dans la structure du tunnel, suggère que le moteur sismique n'est pas l'unique source d'influence de déstabilisation du versant et d'apparition des dommages.

2.5. Pathologies sur l'ouvrage

Les principaux désordres récurrents constatés dans la structure ont été synthétisés ci-dessous :

- Au niveau de la section comprise entre les PM50 et PM90, la section est pincée en clé de voûte du tunnel, plusieurs fissures transversales apparaissent, et traduisent une cinétique du mouvement du versant différente le long du linéaire. Enfin des venues d'eau importantes dans le tunnel ont été mises en évidence. La mise en évidence d'une fissuration particulièrement intense, des déformations maximales enregistrées entre les PM68 et PM79 ont été analysées par Chapelard M. (1978), comme le résultat de l'encaissement du tunnel entièrement dans les éboulis. Cela provoque l'enfoncement relatif de cette section du tunnel. L'analyse de l'encaissement réalisée tend à ajouter qu'au niveau de cette section l'orientation du mouvement dans les éboulis est peut être plus transversale par rapport à l'axe du tunnel, conduisant ainsi à accentuer les désordres au niveau de ce tronçon. Dans tous les cas, l'importance des désordres dans les 90 premiers mètres du tunnel au sud résulte principalement de la transition de faciès calcschistes à schistes noirs et surtout à l'interception oblique NNW-SSE des formations superficielles (PM46-PM72).
- A proximité de la section au PM420, les désordres résultent de l'interception oblique ENE-WSW avec la coulée boueuse.

Il est intéressant de remarquer la récurrence des désordres au niveau des sections du tunnel à proximité des structures d'éboulis interceptant l'ouvrage. En tenant compte de la présence d'un écoulement au sein de ces formations, il est normal de présumer un moteur hydraulique ponctuel entraînant un comportement par à-coups. Cependant il ne faut pas négliger pour autant les désordres lents au niveau des autres sections du tunnel qui doivent au contraire caractériser principalement le phénomène de fluage dans le versant.

Les mesures de contraintes dans la structure, réalisées via la méthode du vérin plat au niveau des 2 sections soumises aux structures d'éboulis, a permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques :

- Une contrainte orthoradiale transversale plus élevée en clé de voûte du tunnel, contrairement à de nombreux ouvrages analogues où la clé est déchargée. Cette observation est expliquée par des contraintes principales dans le massif parallèles à la pente du versant.
- Une diminution des contraintes orthoradiales transversales entre 1978 et 2006, principalement celles mesurées en clé de voûte du tunnel, au niveau des formations superficielles.
- Les contraintes orthoradiales transversales mesurées sont plus élevées que les contraintes orthoradiales longitudinales. Cette observation est en rapport avec le champ de contrainte dans le versant caractérisé par une contrainte principale maximum parallèle à la pente du versant.

Les pathologies n'ont pour l'instant pas été analysées dans le détail. Il conviendrait de corrélérer les comptes rendus des inspections détaillées des dégâts avec la nature de l'encaissant et notamment les zones interceptées par les éboulis, les mesures de contraintes réalisées et enfin les mesures de déplacement des sections longitudinales.

3. Conclusion des principaux mécanismes moteurs des instabilités de versant et des pathologies des tunnels de sub-surface en contexte de versant instables

Les principaux facteurs pilotant les mécanismes d'instabilités (liste non exhaustive) sont énumérés ci-dessous :

- Moteur sismique : nombres d'articles font références à l'impact des séismes de fortes magnitudes comme moteur des instabilités et d'apparitions des désordres de l'ouvrage à proximité du versant.
- Moteur hydraulique : la mise en évidence de la pluviométrie sur le rechargement de la nappe de versant est un facteur d'accélération des mouvements de versant et d'apparition des désordres (Ceccucci M., 2008).
- Glissement de terrain profond : la présence d'un mouvement de versant profond de grande ampleur, à proximité du tunnel, pouvant être le résultat d'un rééquilibrage lent d'un profil d'équilibre d'un versant suite au dernier retrait glaciaire, peut entraîner des dommages sur l'ouvrage.
- Suppression du pied de versant : l'érosion en pied de versant est une cause de la diminution du facteur de sécurité face au glissement de terrain. Elle résulte généralement de l'incision d'un cours d'eau en pied de versant lequel peut être en situation de régulariser son profil d'équilibre.
- Comportement de fluage de l'encaissant : ce type de comportement entraîne une augmentation lente et différée dans le temps des contraintes et des déplacements dans la structure et des déformations du massif. Dans les contextes d'études de cas à faible profondeur, l'amplitude de ce phénomène peut être importante compte tenu du contexte morphologique de versant. Certains facteurs comme la présence d'eau, conduisent à amplifier l'importance de ce phénomène.

Dans le cas du tunnel de l'Encombrouze, les principaux facteurs d'influence des mouvements au sein du versant et la cinétique d'apparition des désordres ont été étudiés. Le versant est soumis à un glissement de terrain profond associé à un comportement de fluage au sein de l'encaissant des schistes noirs suivant à une vitesse d'évolution lente. La cinétique d'apparition des désordres rend compte de l'existence d'un moteur hydraulique suivant des cycles saisonniers à annuels.

L'impact des séismes, correspond à un facteur d'influence secondaire du fait des délais d'occurrence. Le suivi de l'évolution des désordres dans la structure de l'ouvrage ne permet pas d'identifier cet éventuel impact. De même, le rééquilibrage du profil en long de la Durance, toujours en cours, à l'origine de la première déstabilisation du versant, continue d'avoir une action difficile à préciser sur l'évolution du versant. A long terme cette action pourrait s'avérer importante.

Références :

- Barbier, R., Debelmas, J., 1966. Réflexions et vues nouvelles sur la zone subbriançonnaise au Nord du Pelvoux (Alpes occidentales). *Travaux du Laboratoire de géologie de la Faculté des sciences de Grenoble*, tome 42, 97 - 107.
- Barféty, J-C., 1968. Importance des failles et des glissements superficiels dans le massif de Montbrison et ses environs Briançon (Hautes Alpes). *Travaux du Laboratoire de géologie de la Faculté des sciences de Grenoble*, tome 44, 49 - 54.
- Barféty, J-C., Lemoine, M., De Graciansky, J-C., Tricart, P., Mercier, D., 1968 (b). Carte géologique de la France au 1/50000, feuille de Briançon (N° 823). *Notice explicative*, 180 pages.
- Blanchet, F., Moret, L., 1924. Le problème du Crétacé dans les zones intra-alpines : les « marbres en plaquettes » des environs de Guillestre, leur âge, leur caractère transgressif. *Extrait des Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, tome 178, 1598 pages.
- Causse, L., 2012. Compte rendu de la visite du site de l'Encombrouze. *Rapport SNCF*, 17 pages.
- Ceccucci, M., Maranto, G., Mastroviti, G., 2008. The Serre La Voute Landslide (North-West Italy): Results from ten years of monitoring. *LANDSLIDES AND ENGINEERED SLOPES*. 1111 - 1117.
- Cojean, R., 2008. Note sur le tunnel de l'Encombrouze (Hautes-Alpes) – Analyse du contexte géologique et géomorphologique. *Rapport Armines*, 14 pages.
- Chapelard, M., 1978. Etude géologique et géotechnique des tunnels de l'Encombrouze et de Saint Hippolyte. *Rapport d'étude*, 22 pages.
- Debelmas, J., 1942. Conceptions nouvelles sur la structure de la zone intra-alpine du Sud : Les montagnes entre Vallouise et Guillestre. *Revue de géographie alpine*, tome 42, 268 pages.
- Debelmas, J., 1954. Conceptions nouvelles sur la structure de la zone intra-alpine du Sud : Les montagnes entre Vallouise et Guillestre. *Revue de géographie alpine*, tome 42 N°2, 211 - 222.
- Debelmas, J., 1955. Les zones subbriançonnaise et briançonnaise occidentale entre Vallouise et Guillestre. *Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France*.
- Debelmas, J., Lemoine, M., 1968 (a). Carte géologique de la France au 1/50000, feuille de Guillestre (N° 847). *Notice explicative*, 21 pages.
- Fenart, P., 2007. Tunnel de l'Encombrouze – Approche des dynamiques de glissement de versant sur le site de la Vignette. *Rapport d'étude*, 63 pages.
- Gignoux, M., Moret, L., 1938. Description géologique du bassin supérieur de la Durance.
- Le Goff, B., Bertil, D., Lemoine, A., Terrier, M., 2009. Système de failles de Serenne et de la Haute-Durance (Hautes-Alpes) : évaluation de l'aléa sismique. *Rapport final BRGM/RP-57659-FR*, 163 pages.
- Penck, A. & Brückner, E., 1905. *Les glaciations des Alpes du Sud*. Traduction du livre « Die Alpen im eiszeitalter » par Arbos, 21 - 71.
- Tricart, P., Bouillin, J-P., Dick, P., Moutier, L., Xing, C., 1996. Le faisceau de failles de la haute-Durance et le rejeu distensif du front briançonnais au SE du Pelvoux (Alpes occidentales). *Extrait des Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, tome 323 série II a, 251 - 257.
- Wang, T.T., 2010. Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes. *Engineering Geology* 115, 80 - 95.